

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.19073

长江口及邻近海域凤鲚生境履历重建

杨琴^{1,2}, 赵峰^{1,2,3}, 宋超^{1,3}, 张涛^{1,2,3}, 庄平^{1,2,3}, 姜涛⁴, 杨健⁴

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;
3. 农业农村部东海与长江口渔业资源环境科学观测实验站, 上海 200090;
4. 中国水产科学研究院长江中下游渔业生态环境评价与资源养护重点实验室, 江苏 无锡 214081

摘要: 利用 X-射线电子探针微区技术(EPMA)对长江口崇明和邻近吕四凤鲚(*Coilia mystus*)耳石 Sr 和 Ca 的微化学进行了分析。定量线分析和 Sr 含量面分布图谱显示, 凤鲚耳石核区的 Sr/Ca 比值存在 Sr/Ca<3、3<Sr/Ca<7 和 Sr/Ca>7 这 3 种类型, 分别对应的耳石核心面分布同心环区域颜色为蓝色、绿色和黄-红色, 据此推断长江口及邻近海域凤鲚孵化场存在 3 种, 即淡水孵化场、河口半咸水孵化场及海水孵化场。凤鲚个体耳石从核心到边缘的 Sr/Ca 比值变化波动极为显著, 有对应淡水生活的低值阶段(Sr/Ca<3, 最小为 2.04±0.87), 也有对应海水生活的高值阶段(Sr/Ca>7, 最大为 7.81±0.91), 可将凤鲚的生境履历类型分为 4 种类型: 淡水-河口半咸水型、河口半咸水定居型、河口半咸水-海水型和淡水-河口半咸水-海水型。长江口邻近海域吕四凤鲚有淡水和河口半咸水孵化个体, 其生境履历类型包括淡水-河口半咸水型、河口半咸水-海水型和淡水-河口半咸水-海水型, 而长江口崇明岛海域有海水及河口半咸水孵化个体, 其生境履历类型包括淡水-河口半咸水型、河口定居型及淡水-河口半咸水-海水型, 这反映了长江口崇明岛及邻近海域吕四 2 个海域凤鲚个体间的共性以及差异性。通过本次研究, 首次证明了长江口及邻近海域凤鲚存在 3 种孵化场及 4 种生境履历类型, 准确反映了凤鲚个体组成及其生活史的多样性和复杂性。

关键词: 长江口; 凤鲚; 耳石; 电子探针微区分析; 生境履历

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)06-1175-10

凤鲚(*Coilia mystus*), 隶属于鲱形目(Clupeiformes), 鳀科(Engraulidae), 鲚属(*Coilia*), 其营养价值丰富且味道鲜美^[1], 为长江口重要的渔业资源, 曾占长江口总渔获量的 48.6%^[2]。而近年来由于过度捕捞、环境污染及生境退化等因素, 凤鲚资源急剧下降, 几乎不成渔汛^[3-4]。凤鲚为半溯河洄游性鱼类, 平时栖息于沿岸或近海, 繁殖季节由海入江集群到咸淡水区域进行生殖洄游, 其生长、发育和繁殖受淡水、河口半咸水及海水环境的影响, 因此具有复杂的生境履历^[5-6]。

X-射线电子探针微区分析技术(EPMA)是研究鱼类个体发育及迁徙历史的一种有效方法, 鱼

类耳石中的 Sr/Ca 比值及 Sr 含量的面分布特征与其个体生存淡水、河口半咸水及海水盐度显著相关, 运用耳石 Sr/Ca 比值及面分布特征所存在的差异可以成功反演鱼类个体生活履历, 比如追溯其栖息地的变化、种群结构及出生来源^[7-13], 在刀鲚(*Coilia nasus*)^[14-15]、大辽河口红狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus rubicundus*)^[16]、有明银鱼(*Ariake icefish*)^[17]、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)^[18]、鲻(*Mugil cephalus*)^[19]等鱼类生境履历研究中取得了一定的进展。迄今为止, 利用耳石微化学对长江口凤鲚生境履历的研究报道较少, 仅 Yang 等^[5-6]在 2006 年基于耳石微化学对长江口凤鲚生境履

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-04-16.

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目(2017-02-08-00-07-F00075); 农业农村部财政专项(2130135-探捕).

作者简介: 杨琴(1994-), 女, 硕士研究生, 专业方向为水生生物学. E-mail: 1581150350@qq.com

通信作者: 赵峰, 研究员. E-mail: zhaof@ccsf.ac.cn

历进行了研究,认为其在生殖过程中上溯到淡水环境中进行产卵孵化,只存在淡水孵化场,生境履历类型也较为简单。近年来凤鲚资源的严重衰退,群体低龄化、体型小型化以及环境因素等^[20]的变化是否导致凤鲚孵化场及生境履历发生改变尚未可知,本研究旨在利用微化学实验手段研究长江口及邻近海域凤鲚耳石 Sr/Ca 特征,在 Yang 等^[5-6]研究基础上进一步补充研究长江口及邻近海域凤鲚个体生境履历模式,准确划分其生境履历类型,这对了解长江口凤鲚群体栖息地利用及群体结构组成具有重要意义,进而为长江口凤鲚资源的保护及管理提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究所用 10 尾凤鲚于 2018 年 9 月 10 日分别在崇明 (121°44'57"E; 31°23'22"N) 和吕四 (121°35'51"E; 32°5'49"N) 2 个区域采集(图 1)。对凤鲚进行基础生物学测量后(表 1),取其左、右矢耳石,分别编号置于 2 mL 离心管中备用。

表 1 凤鲚样品的采样信息
Tab. 1 Sampling information for *Coilia mystus*

样品编号 sample code	地点 location	时间 time	全长/mm total length	体重/g body weight	年龄 age	性别 sex
C1	崇明 Chongming	2018.9.10	182	12.51	1+	♀
C2	崇明 Chongming	2018.9.10	185	15.54	2	♀
C3	崇明 Chongming	2018.9.10	175	14.35	1+	♀
C4	崇明 Chongming	2018.9.10	158	8.73	1	♀
C5	崇明 Chongming	2018.9.10	184	15.48	2	♀
L1	吕四 Lvsi	2018.9.10	150	8.12	1	♀
L2	吕四 Lvsi	2018.9.10	168	14.62	2	♀
L3	吕四 Lvsi	2018.9.10	168	13.83	1	♀
L4	吕四 Lvsi	2018.9.10	167	13.71	2	♀
L5	吕四 Lvsi	2018.9.10	162	11.58	1+	♀

1.2 方法

1.2.1 耳石的前处理及微化学分析 参考 Liu 等^[9]和 Yang 等^[5-6]的方法,将耳石超声波清洗后再置于蒸馏水中清洗,于室温下干燥 24 h 待用。耳石微化学分析之前,先将耳石用 AB 胶水黏于磨具

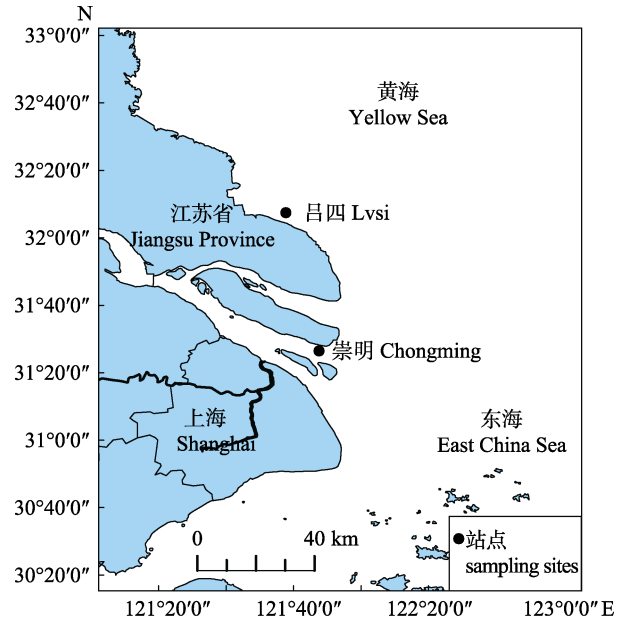


图 1 凤鲚样品采样点示意图
Fig. 1 Sampling sites of *Coilia mystus*

底座进行环氧树脂包埋;树脂凝固后并取出,使用 AB 胶将其黏贴于载玻片上,使用 500 目砂轮和 1200 目砂纸打磨至核心暴露;使用磨抛机(LaboPol-35, 丹麦 Struers 公司)装备机织布抛光盘配合抛光液抛光,至耳石表面无明显划痕;样品放入 Millo-Q 水中超声清洗 5 min 后,自然条件下晾干 24 h;完全干燥后,使用真空镀膜机(JEE-420, 日本电子株式会社)蒸镀碳膜(36A, 25S)。

X 射线电子探针微区分析仪(EMPA, JXA-8100 型, 日本电子株式会社)分析耳石锶、钙元素含量。自耳石核心沿最长径至耳石边缘的一条直线(耳石径)进行定量线分析。EMPA 设定参数:加速电压为 15 kV,电子束流为 2.0×10^{-7} A,束斑直径为 5 μm ,每点驻留时间为 15 s,样品点分析间隔为 15 μm 。使用碳酸钙(CaCO_3)和钛酸锶(SrTiO_3)作为标准样品。定量线分析完成后,进行元素面布分析。此刻 EMPA 设定参数:加速电压为 15 kV,电子束流为 5.0×10^{-7} A,束斑直径为 5 μm ,像素为 7 $\mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,每点驻点时间为 30 ms。

耳石分析完后,重新抛光并去除表面碳膜,并用 5%EDTA 酸蚀以读取年龄^[21]。

1.2.2 数据处理 所有数据使用 Excel 2016 汇总和 Adobe Photoshop CC 2018 进行绘图。所有个体

耳石微化学数据分别引入分析格局变化的 STARS^[22-23](Sequential *t*-test Analysis of Regime Shifts), 以更加直观清楚地观察凤鲚耳石 Sr/Ca 比值变化趋势; 其中置信度 *P* 是 0.5、截断长度设定为 5、Huber 权重设置为 1, 绘制耳石 Sr/Ca 比值的格局转换曲线, 并使用 SPSS 23.0 对耳石不同 Sr/Ca 比值变化阶段测定比值之间进行非参数 Mann-Whitney *U*-test 检验。

2 结果与分析

从 Sr 含量电子探针面分布图谱来看, 凤鲚 Sr 含量面分布分析图同心环区域颜色变化程度与定量线分析趋势转换结果一致, 参考淡水、河口半咸水和海水所对应的 Sr/Ca 比值(<3、3~7 和 >7) 以及面布分析同心环区域颜色(蓝色、绿色、黄~红色)的标准^[5-6], 从耳石核心同心环区域开始, 不同阶段 Sr/Ca 比值对应不同颜色同心环区域, 呈现蓝色、绿色、黄色、红色等颜色变化模式(表 2), 本研究依据耳石核心 Sr/Ca 比值及面分布分析同心环区域颜色将个体划分为 3 个不同盐度水域孵化组: 淡水孵化-蓝色核心区域 L5(第一阶段 Sr/Ca 比值为 2.71±0.37); 河口半咸水孵化-绿色至黄绿色核心区域, 包括 C2(第一阶段 3.45±0.30)、C3(3.97±0.76)、C4(5.18±1.12)、C5(4.3±0.33)、L1(3.76±1.17)、L2(5.60±1.13)、L3(4.89±1.12) 和 L4(5.28±1.05); 海水孵化-红色核心区域 C1(第一阶段 7.28±0.64)(图 3, 表 2)。

分析长江口及邻近海域 10 尾凤鲚(C1、C2、C3、C4、C5、L1、L2、L3、L4、L5)耳石 Sr 含量面分布分析图以及从耳石核心(0 μm)到边缘 Sr/Ca 比定量分析图。面分析结果显示, 凤鲚耳石中不同颜色同心环区域变化较多, 并且定量线分析显示凤鲚个体 Sr/Ca 比值波动较为复杂, 根据耳石 Sr/Ca 比值的趋势转换可以将凤鲚的生境履历分为不同阶段, 相邻阶段差异显著(*P*<0.05, 表 2)。其中最为复杂的凤鲚个体是 L4, Sr/Ca 比值转换阶段最多, 高、低值频繁变动可达 7 个阶段, 阶段范围为 2.18±0.46 (1260~1290 μm)至 7.06±0.67 (210~360 μm); 其次 C5 和 L1 有 6 个阶段 Sr/Ca 比转换值, 不同阶段范围分别为 2.95±0.16 (1785~

1800 μm)至 7.49±1.02 (60~135 μm)、3.76±1.17(0~45 μm)至 7.81±0.91 (450~690 μm); L5 和 L2 有 5 个阶段 Sr/Ca 比转换值, 阶段范围分别为 2.71±0.37 (0~75 μm)至 4.30±0.93 (1725~1860 μm)、2.30±0.82 (1755~1935 μm)至 7.09±0.88 (495~1650 μm); 而 C1 和 C2 Sr/Ca 比值转换阶段均为 3 个阶段, 不同阶段范围分别为 2.41±0.80(1770~1950 μm)至 7.28±0.64 (0~45 μm)、2.78±0.47 (120~150 μm)至 5.47±0.90 (165~1845 μm); C3 和 L3Sr/ Ca 比值转换阶段均为 2 个阶段, 不同阶段范围分别为 2.04±0.87 (1470~1950 μm)至 3.97±0.76 (0~1455 μm)、2.86±1.3 (1545~1575 μm)至 4.89±1.12 (0~1530 μm); 其中 Sr/Ca 比值转换阶段最少的个体为 C4, 仅有 1 个阶段, 阶段值为 5.18±1.12 (0~1545 μm)(图 2, 表 2)。

3 讨论

以往研究多认为长江口凤鲚为短距离半溯河洄游性鱼类^[2, 24-26], 平时生活在河口附近的沿岸或浅海区域, 生殖时进入到河口半咸水或淡水区域进行产卵, 对于凤鲚具体的生活及洄游习性, 只有 Yang 等^[5-6]2006 年基于 EMPA 技术对长江口凤鲚耳石微化学开展过相关研究, 认为凤鲚所有耳石样本都有一个蓝色的核心区域或者在核心周围有一个狭窄的蓝色区域, 认为凤鲚孵化且早期个体发育在淡水环境中, 可能是一种溯河洄游性鱼类, 在非产卵季节也可以在淡水环境中生存, 其生境履历类型较为简单, 而本研究通过耳石微化学测定分析发现长江口及其邻近海域凤鲚个体的生境履历极为复杂, 不仅存在多种孵化场的个体, 还存在不同生境履历类型的个体。

3.1 长江口及邻近海域凤鲚孵化场分析

从孵化场来看, 其中所捕凤鲚耳石核心区 Sr/Ca 比值存在 Sr/Ca<3、3<Sr/Ca<7 和 Sr/Ca>7, 所对应的耳石核心面分布分析同心环区域颜色为蓝色、绿色、黄-红色, 说明了凤鲚早期孵化场存在 3 种: 淡水孵化(L5)、河口半咸水孵化(C2、C3、C4、C5、L1、L2、L3、L4)以及海水孵化(C1)(图 4)。此外考虑到凤鲚的受精卵是一种浮性卵^[27], 其受精卵的移动受水流的影响, 河口半咸水孵化及海水孵化个体可能是在淡水及河口半咸水中受精以

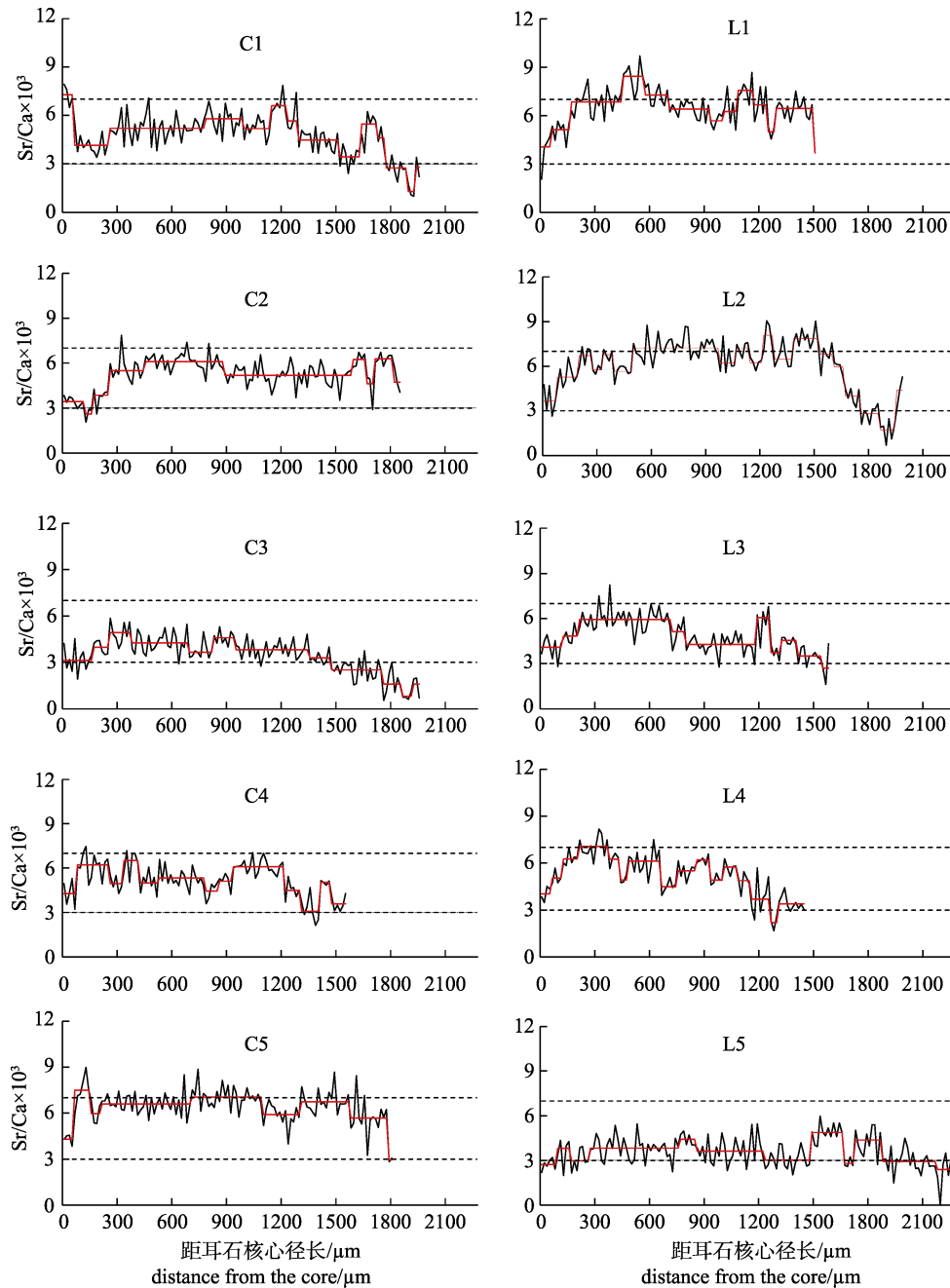


图 2 长江口及邻近海域 10 尾凤鲚耳石从核心到边缘电子探针定量线分析 Sr/Ca 比值变化
黑色线表示 Sr/Ca 比值波动值, 红色实线表示趋势转换。

Fig. 2 Fluctuation of Sr/Ca concentration ratios (black line) along line transects (red line) across the otoliths from the core (0 μm) to the edge of 10 *Coilia mystus* from the Yangtze River Estuary and its adjacent sea area.

后, 受精卵受到上流河水冲积而进入到河口半咸水、海水环境中进行孵化。本研究凤鲚个体孵化类似大辽河口红狼牙虾虎鱼(*O. rubicundus*)^[16], 在淡水、河口半咸水及海水均可以孵化, 不局限于某种盐度水体, 孵化场水域环境具有广盐性, 且仔稚鱼可以在不同盐度水体中生存。

3.2 长江口及邻近海域凤鲚生境履历分析

从生境履历类型来看, 已有研究显示凤鲚 1 龄即可达到性成熟^[24, 28-29], 在繁殖期参与生殖洄游, 而本研究所捕凤鲚年龄均为 1~2 龄(表 1), 从核心耳石到边缘的 Sr/Ca 比值变化波动较大, 平均值最小为 2.04 ± 0.87 (C3), 最大为 7.81 ± 0.91 (L1),

表 2 长江口及邻近海域 10 尾凤鲚耳石中锶和钙的微化学变化
 Tab. 2 Fluctuation of Sr and Ca microchemistry in otoliths of 10 *Coilia mystus*
 from the Yangtze River Estuary and its adjacent sea area

样本编号 sample	Sr/Ca×1000 mean±SD	耳石径长/ μm distance from the core	元素测定点数量 detected points of element	阶段 stage	图 3 中对应的位置 corresponding area in Fig.3
C1	7.28±0.64	0~45	4	1 ^a	红色同心环区域
	5.03±1.01	60~1755	113	2 ^b	黄绿色同心环区域
	2.41±0.80	1770~1950	13	3 ^c	蓝色同心环区域
C2	3.45±0.30	0~105	7	1 ^a	绿色同心环区域
	2.78±0.47	120~150	3	2 ^b	蓝色同心环区域
	5.47±0.90	165~1845	113	3 ^c	黄绿色同心环区域
C3	3.97±0.76	0~1455	98	1 ^a	绿色同心环区域
	2.04±0.87	1470~1950	33	2 ^b	蓝色同心环区域
C4	5.18±1.12	0~1545	104	1	黄绿色同心环区域
C5	4.3±0.33	0~45	4	1 ^a	绿色同心环区域
	7.49±1.02	60~135	6	2 ^b	红色同心环区域
	6.54±0.68	150~690	37	3 ^c	黄色同心环区域
	7.06±0.67	705~1080	26	4 ^b	红色同心环区域
	6.19±0.99	1095~1770	46	5 ^c	黄色同心环区域
	2.95±0.16	1785~1800	2	6 ^d	蓝色同心环区域
L1	3.76±1.17	0~45	4	1 ^a	绿色同心环区域
	6.37±1.05	60~435	26	2 ^b	黄色同心环区域
	7.81±0.91	450~690	17	3 ^c	红色同心环区域
	6.24±0.67	705~1065	25	4 ^b	黄色同心环区域
	7.60±0.69	1080~1155	6	5 ^c	红色同心环区域
	6.21±0.98	1170~1500	23	6 ^b	黄色同心环区域
L2	5.60±1.13	0~480	33	1 ^a	黄绿色同心环区域
	7.09±0.88	495~1650	78	2 ^b	红色同心环区域
	4.01±0.54	1665~1740	6	3 ^c	绿色同心环区域
	2.30±0.82	1755~1935	13	4 ^d	蓝色同心环区域
	4.31±1.04	1950~1980	3	5 ^c	绿色同心环区域
L3	4.89±1.12	0~1530	103	1 ^a	黄绿色同心环区域
	2.86±1.36	1545~1575	3	2 ^b	蓝色同心环区域
L4	5.28±1.05	0~195	14	1 ^a	黄绿色同心环区域
	7.06±0.67	210~360	11	2 ^b	红色同心环区域
	5.32±1	375~1245	59	3 ^a	黄绿色同心环区域
	2.18±0.46	1260~1290	3	4 ^c	蓝色同心环区域
	3.41±0.4	1305~1530	16	5 ^d	绿色同心环区域
	2.80±1.36	1545~1575	3	6 ^c	蓝色同心环区域
	3.14±0.67	1245~1440	13	7 ^d	绿色同心环区域
L5	2.71±0.37	0~75	6	1 ^a	蓝色同心环区域
	3.76±0.90	90~1650	105	2 ^b	绿色同心环区域
	2.79±0.30	1665~1710	4	3 ^a	蓝色同心环区域
	4.30±0.93	1725~1860	10	4 ^b	绿色同心环区域
	2.76±0.88	1875~2265	27	5 ^a	蓝色同心环区域

注: 同一样本, 字母相同表示不同阶段差异不显著($P>0.05$); 不同字母表示差异显著($P<0.05$)(Mann-Whitney U -test).

Note: In one otolith sample, the same letter mean not significant differences($P>0.05$) and different letters mean significant differences ($P<0.05$, Mann-Whitney U -test).

生境履历转化阶段存在简单的个体,也存在较为复杂的个体,与刀鲚(*C. nasus*)^[30]不同的是,刀鲚的生境履历类型可依照其孵化及其早期生活对淡水依存的时间进行划分,而凤鲚个体之间的生境履历类型存在较大的差异性,可在不同盐度水域环境进行孵化及生存,因此可将其生境履历类型可分为 4 种:淡水-河口半咸水型、河口半咸水定居型、河口半咸水-海水型和淡水-河口半咸水-

海水型(图 4)。

第 1 种类型为淡水-河口半咸水型,生境履历不同阶段 Sr/Ca 比值存在 $Sr/Ca < 3$ 和 $3 < Sr/Ca < 7$,包括 L5、C2、C3 和 L3。L5 年龄为 1+, 面分布同心环区域颜色分别为蓝色、绿色、蓝色、绿色、蓝色,其依次经历了淡水及河口半咸水环境的交替变化,其第 5 阶段存在较长一段低 Sr/Ca 比值 ($2.76 \pm 0.88, 1875 \sim 2265 \mu m$),第 2 年轮形成过程中

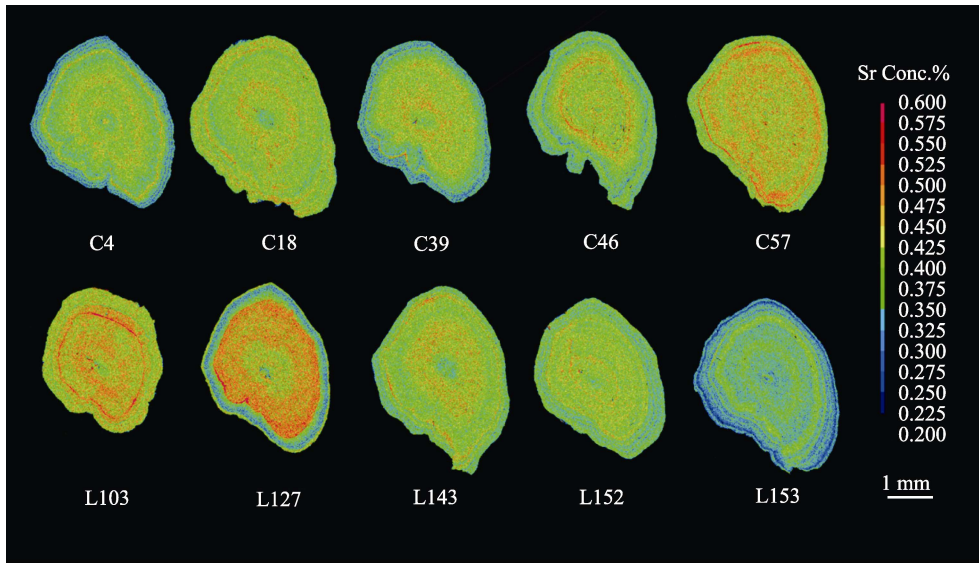


图 3 长江口及邻近海域 10 尾凤鲚耳石 Sr 含量电子探针面分布图谱

Fig. 3 The otolith Sr concentration maps by electron probe microanalysis of 10 *Coilia mystus* from the Yangtze River Estuary and its adjacent sea area

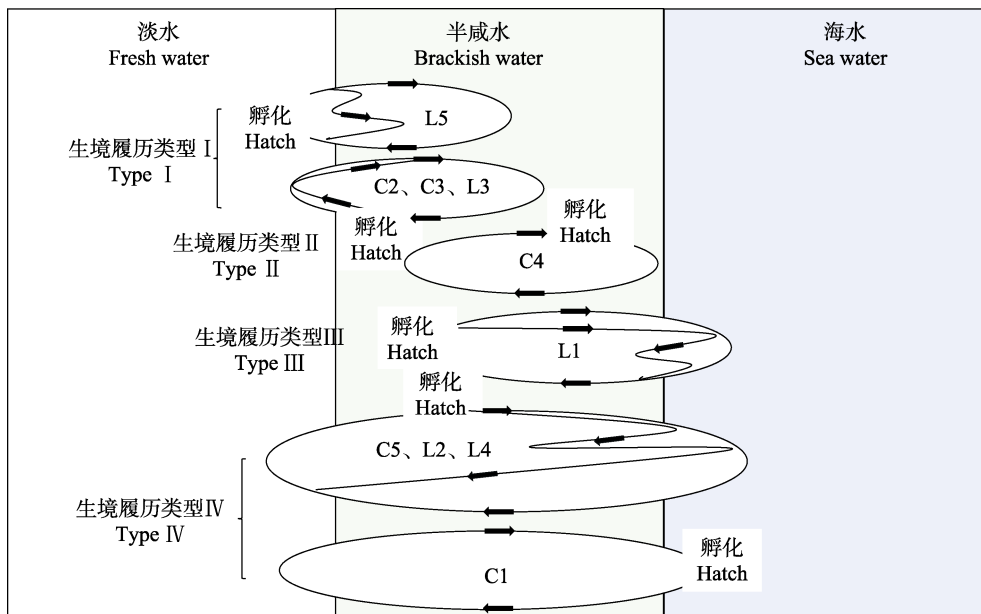


图 4 长江口及邻近海域凤鲚生境履历模式

Fig. 4 Life history patterns of 10 *Coilia mystus* from the Yangtze River Estuary and its adjacent sea area

在淡水环境中生存。C2、C3 年龄为 1+~2 龄, 生境履历转换仅为 2~3 阶段, 耳石面分布颜色变化为绿色及蓝色, 生境履历依次经历了河口半咸水及淡水环境, 其中 C2 生境履历最后 1 阶段在河口半咸水中生存了较长一段时间(Sr/Ca 比值为 5.47 ± 0.90 , $165 \sim 1845 \mu m$), 而 C3 在河口半咸水生存了较长一段时间后, 进入淡水环境中生存了较长一段时间(第 2 阶段 Sr/Ca 比值为 2.04 ± 0.87 , $1470 \sim 1950 \mu m$); L3 年龄为 1 龄, 生境履历转换仅为 2 个阶段, 耳石面分布颜色变化为绿色及蓝色, 生境履历依次经历了河口半咸水及淡水环境, 其生活时间大部分都在河口半咸水环境中(第 1 阶段 Sr/Ca 比值为 4.89 ± 1.12 , $0 \sim 1530 \mu m$), 第 2 阶段 Sr/Ca 比值 < 3 ($1545 \sim 1575 \mu m$), 其生存也受淡水环境的影响, 但这种影响时间较短。

第 2 种类型为河口定居型, 生境履历不同阶段 Sr/Ca 比值均为 $3 < Sr/Ca < 7$, C4 属于这种类型, 年龄为 1 龄, 其生境履历仅 1 个阶段, 耳石面分布同心环颜色呈现为绿色, 说明这尾凤鲚从出生以及后期的生长发育均在河口半咸水环境中, 繁殖时期可能只在河口半咸水中进行, 可能属于河口定居型。

第 3 种类型属于河口半咸水-海水型, 生境履历不同阶段 Sr/Ca 比值为 $3 < Sr/Ca < 7$ 和 $7 < Sr/Ca$, 其中 L1 为此类型, 年龄为 1 龄, 生境履历转换阶段较为复杂, 有 6 个转换阶段, 但耳石面分布同心环区域呈现绿色、黄色、红色、黄色、红色及黄色变化, 其生存依次经历了河口半咸水及海水环境交替变化, 生存只受到河口半咸水及海水环境影响。

第 4 种类型为淡水-河口半咸水-海水型, 生境履历不同阶段 Sr/Ca 比值存在 $Sr/Ca < 3$ 、 $3 < Sr/Ca < 7$ 和 $Sr/Ca > 7$, 包括 C5、L2、L4 及 C1。C5、L2 和 L4 年龄均为 2 龄, C5 和 L4 生境履历最为复杂, Sr/Ca 比值转换达到 6~7 个阶段, 而 L2 可达 5 个阶段, 3 尾凤鲚耳石面分布同心环均呈现黄绿、红、黄、蓝几种颜色变化, 生境履历均经历了河口半咸水、海水和淡水 3 种区域, 这 3 尾凤鲚生境履历后期都回到盐度较低的淡水环境及河口半咸水环境中; 而 C1 年龄为 1+, 其生境履

历转换为 3 个阶段, Sr/Ca 比值在每个阶段值依次减小, 耳石同心环颜色变化为红色、黄绿色、蓝色, 生境履历依次经历了海水、河口半咸水和淡水 3 个环境。

3.3 长江口及邻近海域凤鲚个体差异分析

从地理位置来看, 本研究取样包括长江口崇明岛和吕四 2 个区域, 发现长江口邻近海域吕四的凤鲚个体为淡水孵化(L5)以及河口半咸水孵化(L1、L2、L3、L4), 存在 3 种生境履历类型, 包括淡水-河口半咸水型(L5、L3)、河口半咸水-海水型(L1)、淡水-河口半咸水-海水型(L2、L4), 导致这一现象的原因, 可能是由于吕四地处长江三角洲, 北临黄海海域, 这里的凤鲚个体生存环境本身处于盐度较高的环境, 在繁殖期间可能到邻近的淡水河流区域进行产卵孵化, 也可能向下洄游至长江口半咸水区域进行生殖; 而崇明岛海域存在海水(C1)和河口半咸水(C2、C3、C4、C5)孵化的凤鲚个体, 也存在 3 种生境履历类型个体, 包括淡水-河口半咸水型(C2、C3)、河口定居型(C4)、淡水-河口半咸水-海水型(C5、C1), 这里的环境属于河口区外侧的半咸水区域, 凤鲚个体可能向上到河口内侧的半咸水区域进行产卵孵化, 也可能向上或向下到盐度较高的海水环境中进行产卵孵化(图 4)。这 2 个区域既有相同的孵化场及生境履历类型的凤鲚个体, 又存在不同孵化场及生境履历类型的差异性个体, 由此推测崇明岛海域凤鲚可能混合有来自吕四海域的凤鲚个体, 吕四海域凤鲚群体也可能存在来自崇明岛海域的凤鲚个体。

3.4 总结

本研究基于耳石微化学技术手段有效地重建了长江口及邻近海域凤鲚生境履历模式, 证实了长江口及邻近海域凤鲚个体存在 3 种孵化场, 即淡水孵化场、河口半咸水孵化场及海水孵化场, 同时具有 4 种生境履历类型, 即淡水-河口半咸水型、河口半咸水定居型、河口半咸水-海水型和淡水-河口半咸水-海水型, 这反映了凤鲚孵化场及生境履历类型的多样性和复杂性, 整个生活史可以适应多种盐度水环境条件。本研究与 Yang 等^[5-6]对长江口凤鲚耳石微化学研究方法、取样量和地

点都大致相同,可研究结果却出现了很大的差异, Yang 等采自长江口崇明岛海域 5~10 尾凤鲚,但研究结果均显示凤鲚均是淡水孵化个体,生境履历类型多为淡水-河口半咸水-海水型,而本研究中长江口崇明岛海域凤鲚首次出现了 2 种孵化场,早期孵化都在河口半咸水或海水环境中,其中在河口半咸水环境中孵化的个体最多,生境履历类型多为淡水-河口半咸水型及淡水-河口半咸水-海水型,同时也可能具有河口定居型个体(C4),生境履历类型较为复杂。在以往研究基础上,本研究还采集长江口邻近海域吕四 5 尾凤鲚个体进行研究,结果发现凤鲚个体只有一尾为淡水孵化,其余都为河口半咸水孵化个体,也新发现凤鲚个体生境履历类型存在河口半咸水-海水型。

综上,本研究认为近年来长江口及邻近海域凤鲚个体孵化场及生境履历过程发生了较大的变化,推测其产卵场也可能发生了一定的变化,因此今后应将凤鲚耳石日龄、年龄、性腺发育期及其所在水体盐度变化规律相结合,加大采样量以及丰富采样地点,进一步更为精确的构建长江口及邻近海域凤鲚生活史过程的时间与空间模式,从而为凤鲚的资源保护与人工繁殖提供科学依据。

参考文献:

- [1] Qu W, Song C, Zhao F, et al. Evaluation of nutritive quality and nutrient component of adult female and male *Coilia mystus* collected from the Yangtze Estuary[J]. Marine Fisheries, 2017, 39(3): 297-305. [瞿文, 宋超, 赵峰, 等. 长江口凤鲚雌雄成体营养成分分析与比较[J]. 海洋渔业, 2017, 39(3): 297-305.]
- [2] Zhang G X, Hua J D. Estimates on resource change and MSY of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary[J]. Fisheries Science and Technology, 1990, 17(5): 130-134. [张国祥, 华家栋. 长江口凤鲚资源的变动及其最大持续产量的估算[J]. 水产科技情报, 1990, 17(5): 130-134.]
- [3] Liu K, Xu D P, Duan J R, et al. Fluctuation of biological characteristics and yield of *Coilia mystus* in fishing season after impoundment of the Three Gorges Dam in Yangtze River Estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(10): 1282-1288. [刘凯, 徐东坡, 段金荣, 等. 三峡蓄水后长江口凤鲚汛期生物学特征及捕捞量变动[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10): 1282-1288.]
- [4] Song C, Zhao F, Yang Q, et al. On species composition and damage of deepwater stow-net catches of *Coilia mystus* in the north branch of the Yangtze Estuary[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(6): 670-678. [宋超, 赵峰, 杨琴, 等. 长江口北支凤鲚深水张网渔获种类组成及其危害性分析[J]. 海洋渔业, 2018, 40(6): 670-678.]
- [5] Yang J, Arai T, Liu H B, et al. Environmental signature in the otolith elemental fingerprint of the tapertail anchovy, *Coilia mystus*, from the Changjiang estuary, China[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22(5): 459-462.
- [6] Yang J, Arai T, Liu H B, et al. Reconstructing habitat use of *Coilia mystus* and *Coilia ectenes* of the Yangtze River Estuary, and of *Coilia ectenes* of Taihu Lake, based on otolith strontium and calcium[J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69(4): 1120-1135.
- [7] Xiong Y, Liu H B, Tang J H, et al. Application of otolith microchemistry on reconstruction of migratory patterns and stock discrimination in marine fishes[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2015, 27(7): 953-959. [熊瑛, 刘洪波, 汤建华, 等. 耳石微化学在海洋鱼类洄游类型和种群识别研究中的应用[J]. 生命科学, 2015, 27(7): 953-959.]
- [8] Liu H B, Jiang T, Qiu C, et al. Otolith microchemistry of four fish species from the Changjiang River Estuary, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(6): 1358-1364. [刘洪波, 姜涛, 邱晨, 等. 长江口水域四种鱼类的耳石微化学研究[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(6): 1358-1364.]
- [9] Liu H B, Jiang T, Yang J. Unravelling habitat use of *Coilia nasus* from the Rokkaku River and Chikugo River estuaries of Japan by otolith strontium and calcium[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(6): 52-60.
- [10] Zhu G P. Otolith microchemistry of tuna species: Research progress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2211-2218. [朱国平. 金枪鱼类耳石微化学研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2211-2218.]
- [11] Hogan J D, Kozdon R, Blum M J, et al. Reconstructing larval growth and habitat use in an amphidromous goby using otolith increments and microchemistry[J]. Journal of Fish Biology, 2017, 90(4): 1338-1355.
- [12] Fowler A M, MacReadie P I, Bishop D P, et al. Using otolith microchemistry and shape to assess the habitat value of oil structures for reef fish[J]. Marine Environmental Research, 2015, 106: 103-113.
- [13] Cameron L, Baumgartner L, Butler G, et al. Using otolith microchemistry to differentiate between stocked and unstocked Australian bass (*Percales novemaculeata*)[J].

- Fisheries Research, 2016, 183: 86-91.
- [14] Khumbanyiwa D D, Li M M, Jiang T, et al. Unraveling habitat use of *Coilia nasus* from Qiantang River of China by otolith microchemistry[J]. Regional Studies in Marine Science, 2018, 18: 122-128.
- [15] Li M M, Jiang T, Daniel K D, et al. Reconstructing habitat history of *Coilia nasus* from the Hexian section of the Yangtze River in Anhui Province by otolith microchemistry[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(5): 1054-1061. [李孟孟, 姜涛, Khumbanyiwa Davison Daniel, 等. 基于耳石微化学的长江安徽和县江段刀鲚生境履历重建[J]. 水生生物学报, 2017, 41(5): 1054-1061.]
- [16] Lu M J, Liu H B, Jiang T, et al. Preliminary investigations on otolith microchemistry of *Odontamblyopus rubicundus* in the Daliao River Estuary, China[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(4): 310-317. [卢明杰, 刘洪波, 姜涛, 等. 大辽河口红狼牙鰕虎鱼耳石微化学的初步研究[J]. 海洋渔业, 2015, 37(4): 310-317.]
- [17] Xie Y H, Tang Z P, Xie H, et al. Microstructure and microchemistry in otolith of *Ariake icefish (Salanx ariakensis)*[J]. Acta Zoologica Sinica, 2001, 47(2): 215-220. [解玉浩, 唐作鹏, 解涵, 等. 有明银鱼耳石显微结构和微化学研究[J]. 动物学报, 2001, 47(2): 215-220.]
- [18] Xiong Y, Liu H B, Liu P T, et al. Reconstructing habitat history of *Larimichthys polyactis* in Lüsi coastal waters of Jiangsu Province, China based on otolith microchemistry[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 836-842. [熊瑛, 刘洪波, 刘培廷, 等. 基于耳石元素微化学的江苏吕泗近岸小黄鱼生境履历重建[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 836-842.]
- [19] Yang J, Liu H B. Otolith microchemistry of grey mullet *Mugil cephalus* from Chongming water in the Yangtze River estuary, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 853-858. [杨健, 刘洪波. 长江口崇明水域鲻鱼耳石元素微化学分析[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 853-858.]
- [20] Yu X. The research of biological characteristics of anadromous spawning *Coilia mystus* in estuary of the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [于晓. 长江口凤鲚繁殖群体的生物学特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [21] Jiang T, Yang J, Liu H B, et al. Life history of *Coilia nasus* from the Yellow Sea inferred from otolith Sr:Ca ratios[J]. Environmental Biology of Fishes, 2012, 95(4): 503-508.
- [22] Rodionov S N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(9): 111-142.
- [23] Rodionov S N, Overland J E. Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(3): 328-332.
- [24] Zeng Q, Dong F Y. Study on the biological characteristics and factor correlation of *Coilia mystus* propagating population[J]. Journal of Lake Sciences, 1993, 5(2): 164-170. [曾强, 董方勇. 凤鲚繁殖群体的生物学特性及因数关系的研究[J]. 湖泊科学, 1993, 5(2): 164-170.]
- [25] Cheng Q Q, Ma C Y, Cheng H P, et al. Mitochondrial DNA diversity of *Coilia mystus* (Clupeiformes: Engraulidae) in three Chinese estuaries[J]. Environmental Biology of Fishes, 2008, 83(3): 277-282.
- [26] Zhang H, Quan W M, Chen Y G, et al. Seasonal changes of fish community composition in the subtidal water in the mouth area of Yangtze Estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1534-1539. [张衡, 全为民, 陈渊戈, 等. 长江口口门区潮下带水域鱼类群落组成的季节变化[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1534-1539.]
- [27] Ni Y, Wang Y L, Jiang M, et al. Biological characteristics of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 6(5): 69-71. [倪勇, 王云龙, 蒋玫, 等. 长江口凤鲚的渔业生物学特性[J]. 中国水产科学, 1999, 6(5): 69-71.]
- [28] Wang H H, Zhang T, Song C, et al. Age structure and growth characteristics of reproductive population of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(6): 609-615. [王焕焕, 张涛, 宋超, 等. 长江口凤鲚繁殖群体的年龄结构和生长特性[J]. 海洋渔业, 2016, 38(6): 609-615.]
- [29] Liu K, Zhang M Y, Xu D P, et al. Studies on resource change and MSY of *Coilia mystus* in the Yangtze Estuary[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2004, 13(4): 298-303. [刘凯, 张敏莹, 徐东坡, 等. 长江口凤鲚资源变动及最大持续产量研究[J]. 上海水产大学学报, 2004, 13(4): 298-303.]
- [30] Li M M, Jiang T, Chen T T, et al. Otolith microchemistry of the estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* from the Anqing section of the Yangtze River and its significance for migration ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2788-2795. [李孟孟, 姜涛, 陈婷婷, 等. 长江安庆江段刀鲚耳石微化学及洄游生态学意义[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2788-2795.]

Habitat history reconstruction of *Coilia mystus* from the Yangtze River Estuary and its adjacent sea area

YANG Qin^{1,2}, ZHAO Feng^{1,2,3}, SONG Chao^{1,3}, ZHANG Tao^{1,2,3}, ZHUANG Ping^{1,2,3}, JIANG Tao⁴, YANG Jian⁴

1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. College of Fishery and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Scientific Observing and Experimental Station of Fisheries Resources and Environment of East China Sea and Yangtze Estuary, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200090, China;
4. Key Laboratory of Ecological Environment and Resources of Inland Fisheries, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China

Abstract: As an important fishery resource in the Yangtze Estuary, *Coilia mystus* has high nutritional value and delicious taste. Because of overfishing, environmental pollution, and habitat degradation in recent years, the resources of *C. mystus* have declined sharply. As a type of migratory fish, the growth, development, and reproduction of *C. mystus* are affected by the freshwater, estuarine brackish water, and seawater environment. Therefore, exploring the habitat history of *C. mystus* is of great importance in the protection and management of this resource. To study the habitat history of *C. mystus* in the Yangtze Estuary and its adjacent sea area, otolith microchemical analysis of 10 *C. mystus* from Chongming Island in the Yangtze Estuary and its adjacent Lvsi sea area was conducted using X-ray electron probe microanalysis techniques. Quantitative line analysis and surface distribution of Sr content showed that Sr/Ca ratios in the otolith core area of *C. mystus* existed in $Sr/Ca < 3$, $3 < Sr/Ca < 7$, and $Sr/Ca > 7$, and the corresponding concentric rings were blue, green, and yellow-red in the analysis of the core surface of the otolith. Based on this, it was inferred that the incubation sites of *C. mystus* could be divided into three types: the freshwater incubation field, estuarine brackish water incubation field, and sea water incubation field. The variation in Sr/Ca ratios in the individual otoliths from the core to the edge was highly significant, including low-ratio freshwater habitat ($Sr/Ca < 3$, minimum 2.04 ± 0.87) and high-ratio seawater habitat ($Sr/Ca > 7$, maximum 7.81 ± 0.91). Thus, the habitat history types of *C. mystus* could be divided into four types: freshwater-estuarine brackish water type, estuarine brackish water settlement type, estuarine brackish water-seawater type, and freshwater-estuarine brackish water-seawater type. There were freshwater and estuarine brackish water hatching individuals whose habitat types included freshwater-estuarine brackish water type, estuarine brackish water-seawater type, and freshwater-estuary brackish water-seawater type in the adjacent sea area of the Yangtze Estuary. There were sea water and estuarine brackish water hatching individuals whose habitat types included freshwater-estuarine brackish water type, estuarine brackish water settlement type, and freshwater-estuary brackish water-seawater type in the Chongming Island sea area of the Yangtze Estuary. This reflected the similarities and differences between the individuals in Chongming Island and the Lvsi sea area in the Yangtze Estuary. Through this study, it is proved for the first time that there are three incubation sites and four habitat types in the Yangtze Estuary and its adjacent sea area, which accurately reflect the diversity and complexity of the individual composition and life history of *C. mystus*.

Key words: Yangtze Estuary; *Coilia mystus*; otolith; electron probe microanalysis; habitat history

Corresponding author: ZHAO Feng. E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn